

文章编号: 1674-8190(2023)06-153-07

# 航空油冷发电机过热保护设计的研究及分析

孙立荣<sup>1</sup>, 来帅雷<sup>2</sup>, 刘卓<sup>2</sup>

(1. 中国航空工业集团有限公司 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

(2. 中国航空工业集团有限公司 陕西航空电气有限责任公司, 西安 710076)

**摘要:** 发电机热场分布对过热保护构件失效影响显著, 是其优化设计中应重点考虑的参数。借助 ANSYS 软件中 Fluent 稳态压力求解器和湍流模型对故障模式下发电机内部热场分布进行仿真, 获得主发电机定、转子和壳体循环油路热场分布; 在此基础上, 调整部分关键部位熔点及材料软化温度, 优化热脱扣保护装置设计方案, 实现电机过热保护, 该方案已成功应用于某飞机, 且已通过试验和试飞验证。结果表明: 仿真热场结果与实际工况下的温度场分布一致, 电机出口油温达到 260 °C 时绝缘衬套软化, 导致电机腔体内发生漏油, 当发电机绝缘衬套软化温度提高至 350 °C, 可有效避免发电机烧损。

**关键词:** 油冷发电机; 热脱扣; 热场分布; 过热保护温度; 耐温匹配性

中图分类号: V242

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.06.17

## Research and analysis on overheating protection design of aviation oil-cooled generator

SUN Lirong<sup>1</sup>, LAI Shuailei<sup>2</sup>, LIU Zhuo<sup>2</sup>

(1. Shenyang Aircraft Design Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Shenyang 110035, China)

(2. Shaanxi Aviation Electric Co., Ltd., Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Xi'an 710076, China)

**Abstract:** The thermal field distribution of generator is of a significant effect on the failure phenomenon of the over-heat protection component, which is a key parameter to be considered in the optimization design. The thermal field distribution of the motor under fault mode is simulated by using the steady-state pressure solver and turbulence model in ANSYS software. The thermal field distribution of the stator, rotor and shell circulating oil circuit is obtained. On this basis, the material melting point and softening temperature of key components are adjusted, and design scheme of thermal trip protection device is optimized, which will be helpful to realize the protection of motor overheating, which is successfully applied to a certain aircraft and verified through experiments and flight tests. The results show that the simulation is consistent with the actual temperature field distribution. The simulation results of the thermal field distribution of the generator and low melting point alloy show that the insulation liner softens as the oil temperature at the outlet of the motor reaches 260 °C leading to oil leakage in the motor cavity. Meanwhile, with the softening temperature of generator insulation liner increases to 350 °C, generator burnout is significantly prevented.

**Key words:** oil-cooled generator; thermal tripping; thermal field distribution; overheating protection temperature; temperature matching

收稿日期: 2022-10-08; 修回日期: 2023-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(52071259)

通信作者: 刘卓, liuzhuo0536103@126.com

引用格式: 孙立荣, 来帅雷, 刘卓. 航空油冷发电机过热保护设计的研究及分析[J]. 航空工程进展, 2023, 14(6): 153-159.

SUN Lirong, LAI Shuailei, LIU Zhuo. Research and analysis on overheating protection design of aviation oil-cooled generator[J].

Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(6): 153-159. (in Chinese)

## 0 引言

某型飞机进行供电系统与雷达机上地面交联试验过程中,其研发电机(设计服役温度不大于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ )发生了过热故障,两台发电机的过热保护功能均失效,其热脱扣装置未及时脱扣,导致发电机接线板处绝缘衬套熔化,发电机内部高温油气喷出。

目前,发电机热脱扣装置选用的低熔点合金主要有 Zn-Al 系<sup>[1]</sup>、Zn-Cd 系<sup>[2]</sup>和 Sn-Zn 系<sup>[3]</sup>三种。其中,锡锌(Sn-Zn)合金因其熔点低且具有良好的导电性和力学性能等优点,成为低熔点合金的首选材料。然而,由于 Zn 的高活性,Sn-Zn 体系中的 Zn 很容易被氧化形成某些腐蚀产物(如锌氧化物/氢氧化物和  $\text{ZnCl}_2$ )导致合金性能降低。为了改善 Sn-Zn 低熔点合金的性能,已有研究人员进行了一些研究<sup>[4-5]</sup>。发电机热保护装置通常选用 Sn-Zn 系低熔点合金,在 Sn-Zn 共晶合金中加入 Bi 可以显著提高合金的润湿性并进一步降低熔点<sup>[6]</sup>。因此,本文选择 Sn-Zn-Bi 低熔点合金制备发电机热脱扣装置。

油冷结构与风冷、水冷结构相比,具有重量轻、运动黏度大、散热效率高等优点,设计电机冷却结构的前提是计算电机热场,进而正确分析电机的温度分布,优化材料选择<sup>[7]</sup>。由于发电机结构

的复杂性,实现其内部温度的测量比较困难。随着计算机运算能力的提高,数值计算可作为一种非常有效的前期研制手段预测发电机工作时的流场、温度场和磁场等参数<sup>[8]</sup>。在定子温度场方面,针对定子绕组,V. Ryzhov 等<sup>[9]</sup>采用有限元法对发电机定子温度场进行了模拟,研究发现降低绝缘与定子铁心间隙有助于改善冷却效果;王芳等<sup>[10]</sup>建立了电机定子区域物理模型,获得了定子各结构温升曲线,模拟结果和实验结果吻合良好;Y. V. Shurub 等<sup>[11]</sup>通过模拟转子温度场的分布规律,确定了最佳温度传感器位置,优化了发电机转子的热设计;W. Yoo 等<sup>[12]</sup>采用 CFD 方法模拟了发电机转子流场和温度场分布,模拟结果和实验结果吻合程度较高。

目前,国内针对此类电机过热保护功能失效的故障分析研究尚未见报道。本文为了排查和解决上述发电机故障,对航空油冷发电机过热保护设计进行温度场模拟,提出优化改进方案,该方案现已成功应用于某飞机,且已通过试验和试飞验证。

## 1 航空油冷发电机结构及冷却原理

航空油冷交流发电机自带滑油冷却系统,其油路原理如图 1 所示。

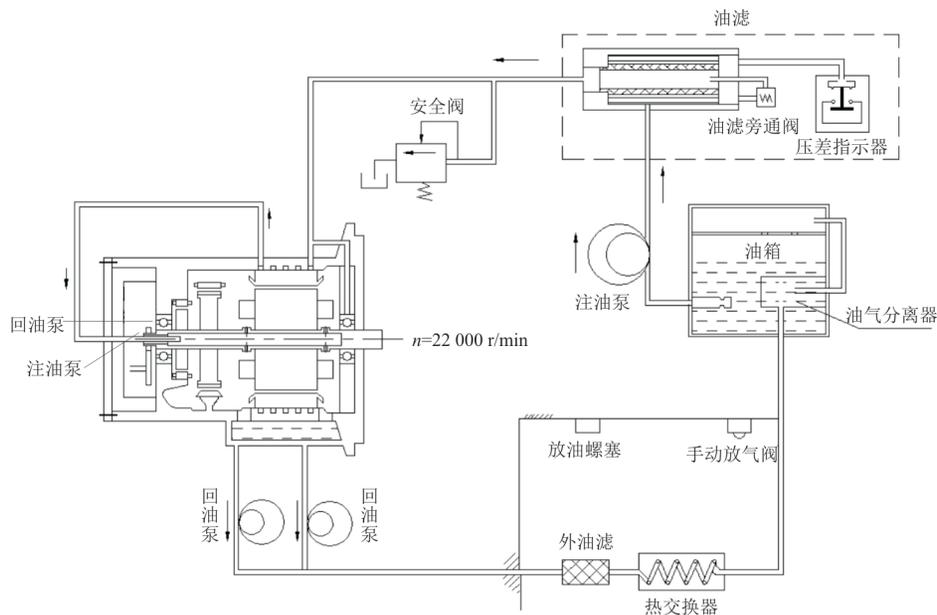


图 1 电机油路原理

Fig. 1 Schematic of motor oil circuit

该冷却系统由泵组件、油箱及相关冷却油路等部件组成,为电机的绕组、轴承等发热部件提供冷却保护。首先注油泵抽取油箱中的滑油到电机壳体循环油路中,对主发定子进行冷却;然后滑油经定子循环后,进入高速旋转的空心轴内,对旋转整流器进行冷却;而后通过喷嘴喷出,对电机腔中的各发热部件进行冷却;最后滑油落入电机壳体底部的回油槽中,被两个回油泵抽出进入外散热管路,经外部散热器冷却后再进入电机油箱中。若发电机滑油冷却系统失效,会造成发电机内部滑油过热<sup>[13-14]</sup>。为避免过热的滑油损坏发电机,需要设置热脱扣保护装置,当滑油温度达到热脱扣保护温度值时,脱扣装置动作,脱开发电机与前端传动装置(机匣)的机械连接,使发电机不再旋转工作,滑油温度不再继续升高,保护发电机不会因过热烧坏向外喷油,对飞机造成严重的影响。

从上述过热保护原理可知,热脱扣保护装置动作温度值的合理设定是至关重要的。既不能发生误动作,也不能发生动作不及时甚至不动作。核查发生故障的发电机热脱扣动作温度指标超过197℃时,输入轴热脱扣。该指标是参照某俄制油冷发电机制定的,在实际设计生产中热脱扣保护装置中采用了低熔点合金进行温度敏感保护,实测低熔点合金温度值为202.8℃。

当发电机内部出现滑油过热问题时,热脱扣保护装置未做出保护动作,而在发电机接线柱处的绝缘衬套处发生喷油故障,说明发电机接线柱绝缘衬套高温损毁的温度与热脱扣保护装置动作温度不协调,破坏先于保护发生。为此,有必要对发电机内部热场进行分析,合理制定热脱扣保护温度指标。

## 2 控制方程

Fluent是在流体动力学控制方程的基础上建立的,控制方程是物理学守恒定律的表达式。流体的流动主要受三大物理守恒定律的约束,分别为质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律,任何形式的流动问题都必须满足这三大定律。

连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) = 0 \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为流体的密度; $v_i$ 为有效断面上的平均速度。

动量方程为

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: $u_i$ 为沿*i*方向的速度分量; $u_j$ 为沿*j*方向的速度分量; $p$ 为压力; $T_{ij}$ 为雷诺应力, $T_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ 。

为了更好地模拟电机内部高速旋转流场,本文选用对有旋均匀剪切流、自由流、腔道流动和边界层流动适应性更好的Realizable  $k-\epsilon$ 模型。

能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\mathbf{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot \left[ K_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\overline{\tau_{\text{eff}}} \cdot \mathbf{v}) \right] + S_h \quad (3)$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \quad (4)$$

式中: $K_{\text{eff}}$ 为有效热传导系数, $K_{\text{eff}} = K + K_t$ ,其中 $K_t$ 为湍流热传导系数,根据所使用的湍流模型来定义; $J_j$ 为组分*j*的扩散流量; $S_h$ 为化学反应热以及其他用户定义的体积热源项。

## 3 发电机热场仿真及故障分析

数值计算采用Ansys Fluent软件,Fluent是一款应用领域较广的国际商用软件,仿真分析包含三个基本环节:前处理、计算求解和后处理。所用几何模型如图2所示。选用适应性更高的非结构网格对发电机内流域、外部环境流域及结构件固体域进行整体网格划分,对于几何外形极复杂、尺寸极小部位进行网格加密,输出后缀名为.msh的网格文件。电机零件种类繁多,结构复杂,前处理选用非结构网格,对于非结构网格,边界层网格层数在10~20之间,对于边界层Prism棱柱层网格,确保边界层内至少15个节点。网格数量达到4 088万,网格质量达到0.2,满足求解器使用要求,如图3~图4所示。

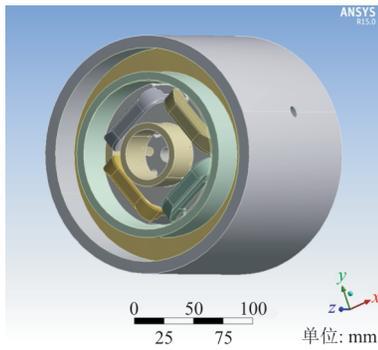


图2 电机热场分析简化模型

Fig. 2 Simplified model for motor thermal field analysis

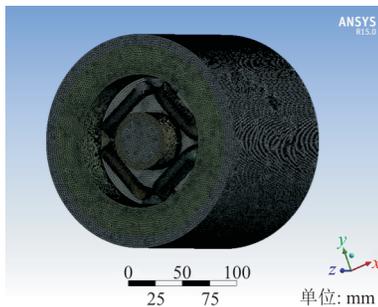


图3 电机整机网格

Fig. 3 Motor grid

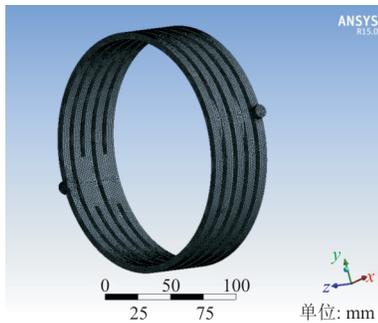


图4 循环滑油网格

Fig. 4 Circulating oil grid

针对油冷发电的流热仿真研究,其内部流动属于湍流流动,因此要考虑湍流运动遵循的湍流输运方程,其中湍流输运方程包括湍动能 $k$ 方程和湍流耗散率 $\epsilon$ 方程。Fluent提供的湍流模型包括单方程(Spalart-Allmaras)模型、双方程模型性(标准 $k-\epsilon$ 模型、重整化群(RNG) $k-\epsilon$ 模型、可实现(Realizable) $k-\epsilon$ 模型)、 $k-\epsilon$ 模型(包括Standard  $k-\epsilon$ 和SST  $k-\epsilon$ )及雷诺应力模型和LES。Realizable  $k-\epsilon$ 对复杂流动的模拟有较好的效果,包括有旋均匀剪切流、自由流(射流和混合层),腔道流动和边界层流动。航空油冷发电机运行工况复杂,内部冷却系统包含多种冷却形式,仿真应用场景与该湍流模型匹配度较高。因此模拟过程选用基于压力的稳态计算器,湍流模型采用Realizable  $k-\epsilon$ 湍流模型。同时采用流体域旋转、流固耦合壁面相对于流体域静止来模拟电机腔内的流动特征。当出口流量与入口流量误差小于0.5%时,视为模型收敛。

发电机励磁机、永磁机发热小,仅约为主发电机发热的5%,且励磁机与永磁机安装位置与低熔点合金位置相隔较远;端盖、油箱等为不发热结构件,对电机热场分布影响不大。因此仅截取主发电机模型进行分析,以主发电机定、转子,壳体循环油路为主要研究对象,对壳体进行简化,仅保留循环油路;对绕组进行简化,将绕组绝缘等均简化为形状相似的一体化复合材料,根据绝缘及铜占比设置符合材料热传导属性。

电机各部件所用材料及热特性参数如表1所示。

表1 各部件材料表

Table 1 List of parts and materials

| 序号 | 部件     | 材料         | 密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 比热容/[ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ] | 导热系数/[ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ] |
|----|--------|------------|--------------------------------------|--|--|
| 1  | 主发定子壳体 | ZM6 镁合金    | 1.770                                | 963  | 113  |
| 2  | 主发定子铁芯 | 1J22 钴钢带   | 8.200                                | 550  | 53   |
| 3  | 主发定子绕组 | 聚酰亚胺漆包铜扁线  | 8.980                                | 385.2  | 380  |
| 4  | 主发转子铁芯 | Hiperco 50 | 8.200                                | 550  | 53   |
| 5  | 主发转子绕组 | 聚酰亚胺漆包铜扁线  | 8.980                                | 385.2  | 380  |
| 6  | 槽楔     | TC6 钛合金棒   | 4.500                                | 461  | 8.8  |
| 7  | 空心轴    | 40CrNiMoA  | 7.850                                | 582.1  | 46.05  |
| 8  | 滑油     | 4050       | 0.972                                | 2 070  | 0.146  |

在 Fluent 进行油冷系统仿真,冷却滑油温度影响其物性参数,本文选用冷却滑油的主要物性能参数随温度变化的计算公式如表 2 所示。

表 2 润滑油参数表  
Table 2 Oil physica property parameter sheete

| 参数   | 计算公式                                      |
|--|---|
| 油品牌号   | XX  |
| 密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$                    | $\rho = 0.9729 - 0.000035t$               |
| 定压热容 $C_p/[\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$   | $C_p = 1.76 + 0.0031t$                    |
| 导热系数 $\lambda/[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$ | $\lambda = 0.1591 - 0.000134t$            |
| 运动黏度 $\nu/(\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1})$                 | $\ln \ln(\nu + 0.6) = 21.52 - 3.54 \ln T$ |

根据试验测量进出口油温数据,设定仿真边界条件,并通过铂电阻测量电机壳体各处温度,对仿真结果进行对正。实测值与仿真分析数据对比如表 3 所示,可以看出:仿真分析设置的进、出口油温与实测值一致的情况下,发电机典型温度测量点循环油路出口、壳体前段、壳体中段处温度实测值与仿真分析结果的最大差值不超过  $2^\circ\text{C}$ ,误差在可控范围内,本文仿真热场模拟结果与实际工况温度场分布基本一致。

表 3 油路数据表  
Table 3 Oil circuit data sheete

| 对比项  | 进口油温/ $^\circ\text{C}$ | 出口油温/ $^\circ\text{C}$ | 循环油路出口油温/ $^\circ\text{C}$ | 壳体前段温度/ $^\circ\text{C}$ | 壳体中段温度/ $^\circ\text{C}$ |
|------|------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 实测   | 90                     | 110                    | 92.2                       | 96.1                     | 95.7                     |
| 仿真分析 | 设置为实测值                 | 设置为实测值                 | 93.0                       | 97.8                     | 96.9                     |

综上所述:

1) 电机定、转子结合部位及绕组温度较高,低熔点合金总体温度较低,接近进口油温。

2) 低熔点合金各部分存在明显温度梯度(低熔点合金未在之前标示清楚,在此温度场结果中不能直观获得温度梯度)。

除此之外,将发生故障时机上实测油温变化曲线(如图 5 所示)作为边界条件进行发电机内部热场分布仿真,结果如图 6 所示,可以看出:此时电机进口油温达到极高值。

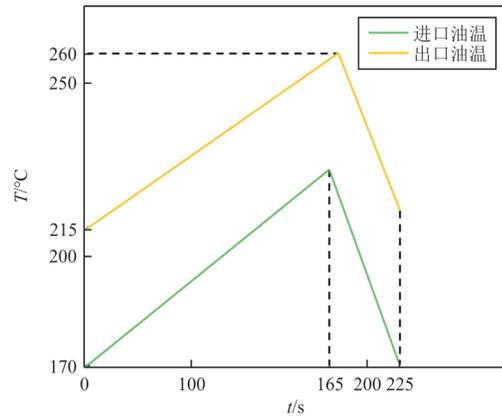


图 5 电机进出口油温变化曲线  
Fig. 5 Oil temperature change curve of motor inlet and outlet

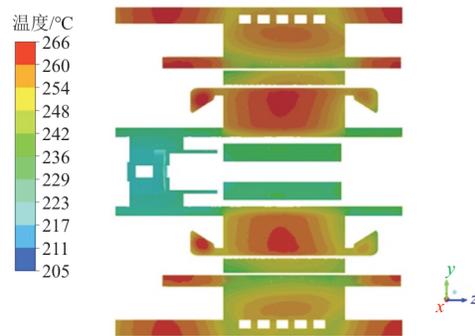


图 6 165 s 时电机热场  
Fig. 6 Motor thermal field at 165 s

165 s 时低熔点合金温度分布如图 7 所示,可以看出:低熔点合金温度最低点温度约为  $191^\circ\text{C}$ ,达不到过热保护装置的动作温度,而绝缘衬套处温度已经达到约  $260^\circ\text{C}$ ,开始软化,滑油在压力作用下从此处喷出。

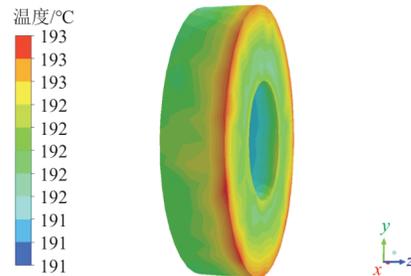


图 7 165 s 时低熔点合金热场  
Fig. 7 Thermal field of low melting point alloy at 165 s

电机热脱扣组件安装在转子空心轴输入端处,温度接近进口油温。电机绝缘衬套安装在电机壳体内壁,过热时高温滑油在离心力作用下甩

至电机壳体内壁后经回油管路抽出,绝缘衬套处温度接近电机出口油温。当电机出口油温持续上升至约  $260^{\circ}\text{C}$ ,绝缘衬套软化,在电机腔体内压力作用下滑油从绝缘衬套处喷出,而此时热脱扣中低熔点合金局部温度仍在  $202^{\circ}\text{C}$  以下,合金部分熔化。当滑油喷出,电机过热现象消失,电机内部温度迅速下降,低熔点合金温度也随之下降。虽然高温持续时间较短,但是局部温度仍低于其熔化温度,合金部分熔化,热脱扣组件未实现热脱扣保护功能。

## 4 优化设计

本文对发电机过热保护功能主要从降低过热保护装置的保护温度点设计值和高发电机耐温薄弱位置的耐温值两个方面开展优化设计。根据上述仿真和分析,结合极限高油温电机热场仿真结果(如图 8 所示)和极限高油温低熔点合金热场分布仿真结果(如图 9 所示),极限高油温状态下低熔点合金处最高温度约为  $180^{\circ}\text{C}$ ,电机其余部位最高温度约为  $205^{\circ}\text{C}$ ,无高出材料耐温等级的现象。

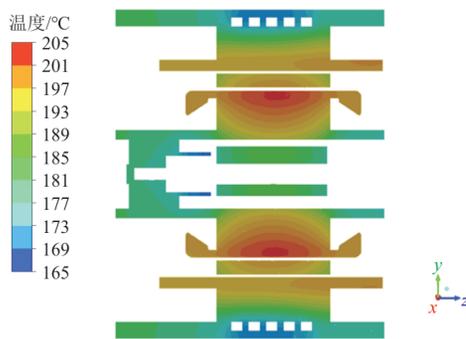


图 8 极限高油温电机热场分布

Fig. 8 Thermal field distribution of extreme high oil temperature motor

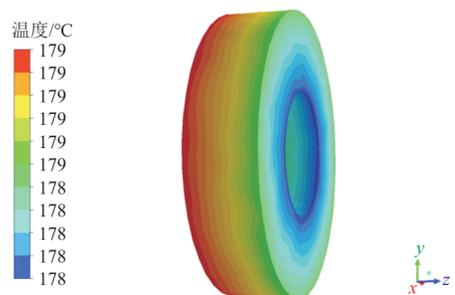


图 9 极限高油温低熔点合金热场分布

Fig. 9 Thermal field distribution of extremely high oil temperature and low melting point alloys

因此,低熔点合金熔点应大于  $180^{\circ}\text{C}$ (正常工作状态极限高油温工况)。考虑到仿真结果的误

差,在保证不发生误保护的前提下,结合国内外同类型电机数据,对低熔点合金进行成分优化设计,调整低熔点合金熔点至  $(195\pm 3)^{\circ}\text{C}$ ,可以保证过热时热脱扣能正常脱开。

目前选用的低熔点合金微观组织照片如图 10 所示,可以看出:低熔点合金由黑色针状相和共晶相组成,黑色的针状相是初生富 Zn 相,共晶相由富 Zn 相和  $\beta\text{-Sn}$  相混合而成。

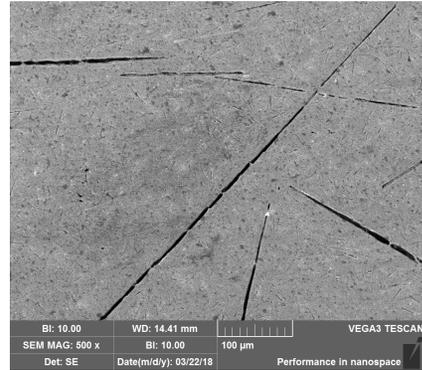


图 10 低熔点合金微观组织

Fig. 10 Microstructure of low melting point alloys

使用差示扫描量热方法(DSC)测量低熔点合金的熔化行为<sup>[15]</sup>。低熔点合金升温阶段 DSC 曲线如图 11 所示,图中最高点为合金熔化点,可以看出:低熔点合金的熔点为  $195.11^{\circ}\text{C}$ 。

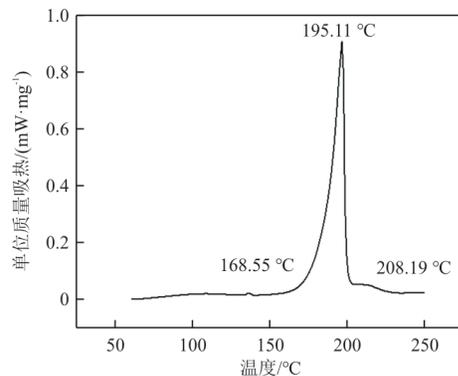


图 11 低熔点合金 DSC 曲线

Fig. 11 DSC Curve of Low Melting Point Alloys

同时,将发电机耐温薄弱位置绝缘衬套软化温度由  $260^{\circ}\text{C}$  提高至  $350^{\circ}\text{C}$ ,彻底避免在热脱扣保护装置动作前,发电机其他部位先烧损。

## 5 试验和试飞验证

为了确保电机在正常最高油温  $165.5^{\circ}\text{C}$  工况下,低熔点合金熔点降低至  $192^{\circ}\text{C}$  不会发生误保护现象,进行正常工作条件下的极限高油温试验,油

温试验数据如表4所示。

表4 油温试验数据  
Table 4 Oil temperature test data

| 负载     | 进口油温/℃ | 工作时间/min |
|--------|--------|----------|
| 60 kVA | 149.0  | 60       |
|        | 165.5  | 10       |

整个试验过程中,油冷发电机工作稳定,未见异常,试验后分解检查热脱扣完好,低熔点合金未发生熔化现象。

优化改进后的油冷发电机在某飞机上开展了后续试飞工作,试飞过程中发电机工作正常,未发生同类故障。

## 6 结 论

1) 当电机出口油温持续上升至约260℃,绝缘衬套软化,在电机腔体内压力作用下滑油从绝缘衬套处喷出,导致漏油现象发生。

2) 可将发电机耐温薄弱位置绝缘衬套软化温度提高至350℃,彻底避免在热脱扣保护装置动作前发电机其他部位先烧损。

3) 通过发电机热场仿真分析,可有效设计热脱扣保护装置,对后续航空油冷发电机过热保护正向设计提供了良好的解决方案。

### 参考文献

- [1] ZHANG X, LI D, WANG L, et al. Ultrasonic brazing of Zr-based bulk metallic glass and 1060 Al alloy using Zn-3Al filler metal [J]. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2022, 5: 100095.
- [2] 卢方焱, 薛松柏, 张亮, 等. Ag-Cu-Zn系钎料的研究现状及发展趋势[J]. *焊接*, 2018(10): 13-19.  
LU Fangyan, XUE Songbai, ZHANG Liang, et al. Research status and development trend of Ag-Cu-Zn series brazing metal[J]. *Welding*, 2018(10): 13-19. (in Chinese)
- [3] SONG J M, WU Z M. Variable eutectic temperature caused by in-homogeneous solute distribution in Sn-Zn system[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54: 1479-1483.
- [4] ZHANG W, ZHANG Z, LIU H. Effects of low melting point SnBi58 alloy on the properties of isotropic conductive adhesives[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2023, 143: 74-96.
- [5] 陈伟, 胡强, 张富文. Bi对Sn-Zn基无铅钎料合金组织与性能的影响[J]. *有色金属*, 2010, 62: 4-8.  
CHEN Wei, HU Qiang, ZHANG Fuwen. Effect of Bi on microstructure and properties of Sn-Zn-based lead-free solder alloy[J]. *Non-ferrous Metal*, 2010, 62: 4-8. (in Chinese)
- [6] ZHAO Y, ZHANG Z, LING Z. Shape-stabilized low melting-point alloy/expanded graphite composite thermal pad

with excellent chip heat dissipation performance[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 217: 191-202.

- [7] 宋科璞, 陈卫东, 刘元度. 基于多场耦合的开关磁阻启动/发电机油冷结构设计[J]. *电机与控制应用*, 2012, 39(6): 6-11.  
SONG Kepu, CHEN Weidong, LIU Yuandu. Design of switched reluctance starting/generator oil cooling structure based on multi-field coupling[J]. *Electrical and Control Applications*, 2012, 39(6): 6-11. (in Chinese)
- [8] HE Feiyang, HAO Jichao, LI Weili, et al. Influence of copper shield structure on 3-delectromagnetic field, fluid and temperature fields in end region of large turbogenerator[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2013, 28(4): 832-840.
- [9] RYZHOV V, DERGACHEV P, KURBATOV P. Three-dimensional thermal stator model of a fully air-cooled turbo-generator[C]// 2020 27th International Workshop on Electric Drives; MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary(IWED). USA: IWED, 2020: 1-4.
- [10] 王芳, 郭瑞倩, 安志华, 等. 空冷发电机定子三维温度场分布与试验对比[J]. *电机与控制学报*, 2013, 17(12): 46-50.  
WANG Fang, GUO Ruiqian, AN Zhihua, et al. Comparison of three-dimensional stator temperature field distribution and test results of air cooled generator[J]. *Journal of Electric Machines and Control*, 2013, 17(12): 46-50. (in Chinese)
- [11] SHURUB Y V, TSITSYURSKIY Y L. Turbogenerator rotor heating in presence of rotor winding defects and excitation current forcing[EB/OL]. [2022-10-08]. [https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=123v0xb0rb0e08g0pc0m0jg0hd320800&site=xueshu\\_se](https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=123v0xb0rb0e08g0pc0m0jg0hd320800&site=xueshu_se).
- [12] YOO W, JEON S, SON C, et al. Full surface heat transfer characteristics of rotor ventilation duct of a turbine generator[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 94: 385-394.
- [13] BARAGULOV B A. 特种交流电机设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.  
BARAGULOV B A. Design of special AC motor[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982. (in Chinese)
- [14] 《中国航空材料手册》编委会. 中国航空材料手册[M]. 2版. 北京: 中国标准出版社, 2002.  
Editorial Board of *China Aeronautical Materials Manual*. China aeronautical materials manual[M]. 2nd ed. Beijing: Standards Press of China, 2002. (in Chinese)
- [15] SIROKY G, KRAKER E, KIESLINGER D, et al. Simulation and experimental characterization of microporosity during solidification in Sn-Bi alloys[J]. *Materials and Design*, 2021, 212: 110,258.

### 作者简介:

孙立荣(1973—),女,硕士,研究员。主要研究方向:飞机供电系统,机电管理系统等。

来帅雷(1984—),男,学士,研究员。主要研究方向:飞机供电系统,电机控制器设计等。

刘卓(1986—),男,学士,高级工程师。主要研究方向:电机设计。

(编辑:马文静)